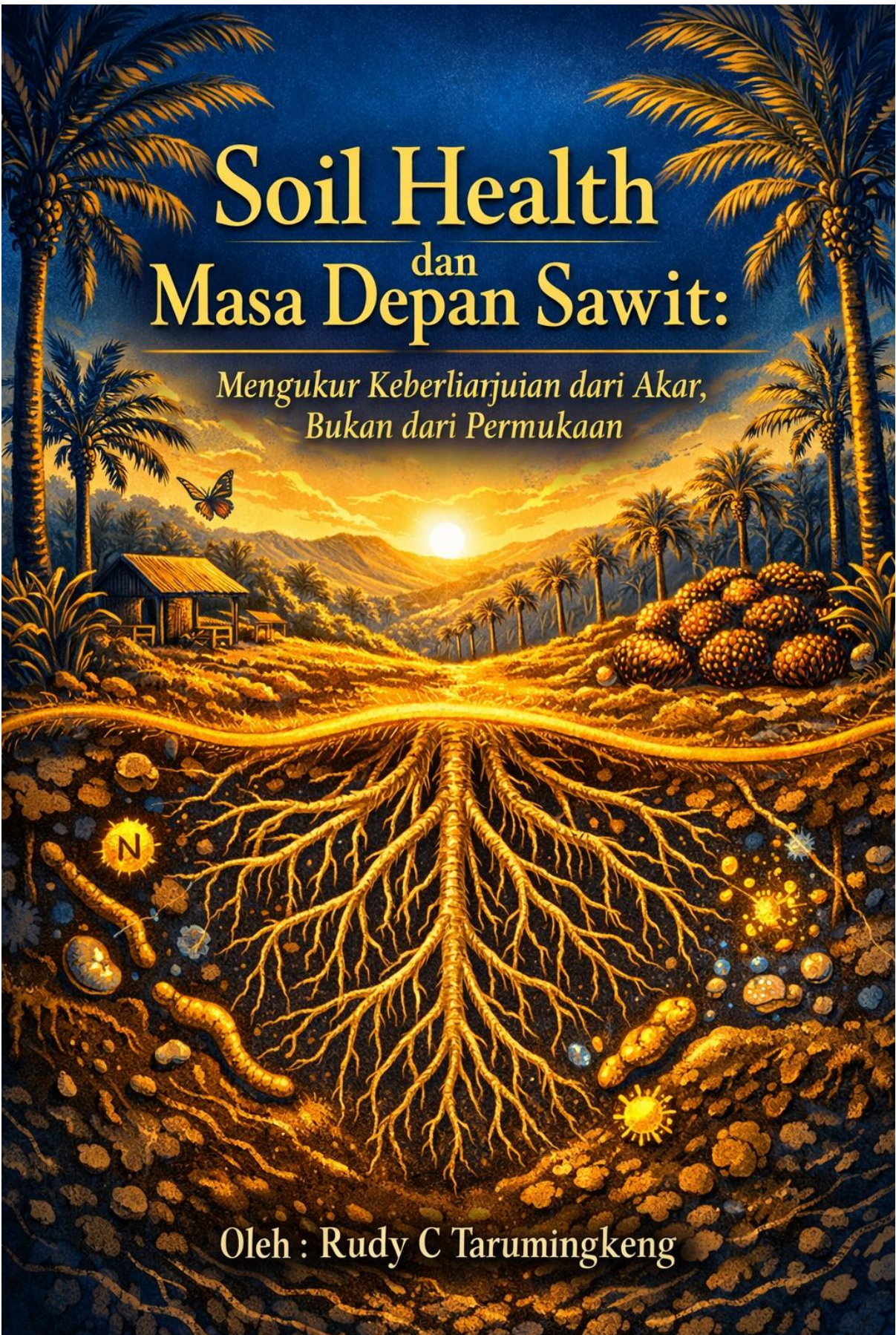




Soil Health dan Masa Depan Sawit:

*Mengukur Keberlanjutan dari Akar,
Bukan dari Permukaan*

Oleh : Rudy C Tarumingkeng

Rudy C Tarumingkeng: Soil Health dan Masa Depan Sawit - Mengukur Keberlanjutan dari Akar, Bukan dari Permukaan

Oleh:

[Prof Ir Rudy C Tarumingkeng, PhD](#)

Professor of Management NUP: 9903252922

Professor Emeritus, IPB-University

Rector, Universitas Cenderawasih, Papua (1978-1988, dan

Rector, Kampus AGRO Manokwari sekarang Universitas Papua Manokwari

Coordinator, CIDA/DIKTI SFU Burnaby BC Canada 1988-1991

Rector, Universitas Kristen Krida Wacana, Jakarta (1991-2000)

Chairman. Board of Professors, IPB-University, Bogor (2005-2006)

AI - Data Analyst, dan Chairman, Academic Senate, IBM-ASMI, Jakarta 2024-

© RudyCT Academic Series

rudyc75@gmail.com

30 March 2026

SOIL HEALTH DAN MASA DEPAN SAWIT - MENGUKUR KEBERLANJUTAN DARI AKAR, BUKAN DARI PERMUKAAN

Abstrak

Dalam diskursus keberlanjutan industri kelapa sawit, ukuran yang paling sering muncul di permukaan adalah produktivitas tandan buah segar, efisiensi pemupukan, kepatuhan sertifikasi, atau citra lingkungan perusahaan. Namun, ukuran-ukuran tersebut sering belum cukup untuk menjawab pertanyaan yang lebih mendasar: apakah tanah yang menopang kebun itu masih sehat, hidup, dan mampu mempertahankan produktivitas dalam jangka panjang. Literatur internasional dan temuan-temuan mutakhir pada lanskap sawit menunjukkan bahwa *soil health* harus dipahami sebagai kapasitas tanah untuk berfungsi sebagai sistem hidup yang menopang produktivitas, kualitas air, kualitas udara, dan kesehatan ekosistem melalui interaksi sifat fisik, kimia, biologis, kondisi perakaran, serta proses-proses rizosfer. Dalam konteks sawit, indikator seperti karbon organik tanah, stabilitas agregat, kepadatan isi, porositas, ketersediaan hara, kapasitas tukar kation, aktivitas mikroba, fauna tanah, biomassa akar, dan kondisi eksudat akar menjadi lebih informatif daripada sekadar melihat warna permukaan tanah atau hasil panen sesaat. Berbagai studi menunjukkan bahwa pemeliharaan understory, aplikasi bahan organik jangka panjang, pengembalian biomassa, dan sistem agroforestri sawit dapat memperbaiki struktur tanah, meningkatkan karbon organik dan

kapasitas tukar kation, memperkaya komunitas mikroba menguntungkan, meningkatkan aktivitas fauna tanah, serta dalam beberapa konteks memperbaiki hubungan antara kesehatan tanah dan performa sawit. Pada saat yang sama, standar keberlanjutan terbaru seperti RSPO 2024 menegaskan bahwa perubahan kesuburan tanah harus dipantau dan dikelola, serta bahwa kesuburan jangka panjang bergantung pada struktur, bahan organik, status hara, dan kesehatan mikrobiologis tanah. Makalah ini berargumen bahwa masa depan sawit tidak dapat diukur hanya dari permukaan—dari angka hasil, kebersihan kebun, atau simbol sertifikasi—melainkan dari kedalaman sistem akar, kualitas rizosfer, keberlangsungan bahan organik, dan fungsi biologis tanah. Dengan demikian, keberlanjutan sawit harus dinilai dari bawah ke atas: dari akar, bukan dari permukaan. ([FAOHome](#))

Kata kunci: *soil health, kelapa sawit, rizosfer, karbon organik tanah, agregat tanah, biota tanah, keberlanjutan, RSPO*

Soil Health dan Masa Depan Sawit: Mengukur Keberlanjutan dari Akar, Bukan dari Permukaan

1. Pendahuluan

Kelapa sawit adalah komoditas strategis dalam ekonomi Indonesia. Publikasi resmi BPS menegaskan bahwa *Statistik Kelapa Sawit Indonesia 2023* memuat data luas areal, produksi, ekspor, dan impor menurut provinsi dan status perusahaan, sedangkan *Outlook Kelapa Sawit 2024* dari Kementerian Pertanian menyatakan bahwa Indonesia merupakan produsen kelapa sawit terbesar di dunia, dengan luas areal 16,83 juta hektar dan produksi 46,82 juta ton pada tahun 2022. Besarnya skala ini menjadikan setiap isu teknis di tingkat kebun—termasuk kualitas tanah—

sebagai isu strategis nasional, bukan sekadar persoalan operasional estate. ([Badan Pusat Statistik Indonesia](#))

Namun, dalam banyak percakapan tentang sawit berkelanjutan, tanah kerap hadir hanya sebagai latar belakang. Yang dibahas adalah ekspansi, produktivitas, harga CPO, sertifikasi, konflik sosial, atau emisi. Tanah sering baru diperhatikan ketika masalah sudah tampak di permukaan: genangan, erosi, penurunan hasil, penyakit, atau kematian tanaman. Cara pandang seperti ini problematik, karena tanah bukan media pasif. Tanah adalah sistem hidup yang menyimpan air, menahan dan melepaskan hara, menopang akar, menjadi habitat mikroorganisme, mengatur dekomposisi, dan menjadi arena utama tempat keberlanjutan sawit benar-benar diuji. FAO menegaskan bahwa tanah sehat adalah tanah yang berfungsi sebagai sistem hidup, bukan sekadar kumpulan sifat fisik-kimia yang statis.

([FAOHome](#))

Di sinilah judul makalah ini memperoleh relevansinya. "Mengukur keberlanjutan dari akar, bukan dari permukaan" adalah sebuah kritik terhadap kecenderungan menilai kesehatan sistem sawit hanya dari gejala luar. Kebun dapat tampak rapi, hasilnya masih cukup tinggi, dan audit administratif dapat berjalan baik, tetapi di bawah permukaan mungkin sedang berlangsung penurunan karbon organik, pemadatan, berkurangnya porositas, menurunnya aktivitas mikroba, atau melemahnya fungsi rizosfer. Bahkan literatur tentang kompaksi tanah di kebun sawit memperlihatkan bahwa hubungan antara kerusakan tanah dan hasil tidak selalu linear dalam jangka pendek; beberapa studi menemukan penurunan hasil, sementara studi lain tidak menemukan perubahan langsung, sehingga hasil panen saja tidak cukup dijadikan proksi tunggal kesehatan tanah. ([Ejournal UNIKS](#))

Makalah ini bertujuan membangun argumen akademik bahwa *soil health* harus menjadi inti baru dalam evaluasi keberlanjutan sawit. Untuk itu, pembahasan akan dimulai dari definisi dan dimensi *soil health*, berlanjut pada kritik terhadap indikator permukaan yang terlalu sempit, kemudian

menguraikan dimensi fisik, kimia, biologis, dan rizosfer, diikuti dengan pembahasan praktik manajemen yang dapat memperbaiki kesehatan tanah. Selanjutnya, makalah ini akan mengaitkan temuan-temuan tersebut dengan konteks sawit Indonesia, termasuk gambut dan standar RSPO 2024, lalu menawarkan kerangka pengukuran keberlanjutan sawit berbasis kesehatan tanah. ([FAOHome](#))

2. Memahami *Soil Health*: dari Kesuburan ke Fungsi Sistem Hidup

Salah satu kekeliruan paling umum dalam agronomi praktis adalah menyamakan kesehatan tanah dengan kesuburan tanah. Padahal keduanya tidak identik. Dalam RSPO 2024, “soil fertility” dirujuk secara lebih sempit sebagai ketersediaan makro-hara dan unsur jejak untuk mendukung pertumbuhan dan produksi, sementara panduan FAO memperlakukan *soil health* secara lebih luas sebagai kapasitas tanah untuk berfungsi sebagai sistem hidup yang menopang produktivitas, kualitas air dan udara, serta kesehatan tanaman dan hewan. Dengan kata lain, tanah dapat saja masih “subur” secara kimia untuk jangka pendek, tetapi tidak “sehat” bila struktur, bahan organik, atau komunitas biologisnya mengalami degradasi. ([RSPO](#))

FAO juga menekankan bahwa definisi *soil health* berbeda dari *soil quality* karena memasukkan unsur waktu—“continued capacity”—dan menempatkan tanah sebagai “vital living system.” Ini sangat penting dalam konteks sawit, yang merupakan tanaman tahunan dengan siklus usaha panjang. Keberlanjutan kebun sawit tidak cukup dinilai dari kemampuan tanah menopang panen hari ini, tetapi dari kemampuannya terus menjalankan fungsi itu sepanjang umur tanam, replanting, dan bahkan setelahnya. Tanah yang hanya “didorong” dengan input untuk mempertahankan hasil sesaat, tetapi kehilangan daya dukung biologis dan struktural, adalah tanah yang produktif secara semu. ([FAOHome](#))

Pendekatan indikator global FAO juga menunjukkan bahwa *soil health* pada dasarnya bersifat multidimensional. Indikator-indikator yang dianggap penting mencakup ketersediaan hara, kemudahan diolah, ketersediaan oksigen bagi akar, kapasitas menahan hara, toksisitas, salinitas, dan kondisi

perakaran. Di sini kita melihat sesuatu yang sangat penting bagi tema makalah ini: akar dan *rooting conditions* secara eksplisit masuk dalam kerangka kesehatan tanah. Jadi, menilai keberlanjutan sawit dari akar bukanlah metafora kosong; ia memang sejalan dengan pendekatan ilmiah mutakhir yang menganggap kondisi zona perakaran sebagai bagian sentral dari kesehatan tanah. ([FAOHome](#))

Penelitian mutakhir pada sistem agroforestri sawit di Amazon Timur memperkuat pendekatan tersebut. Artikel Gomes dan kolega menjelaskan bahwa protokol penilaian *soil health* saat ini mencakup indikator kimia seperti pH, Ca, Mg, P, K, Al, dan karbon yang dapat dioksidasi permanganat; indikator fisik seperti kepadatan dan stabilitas agregat; serta indikator biologis seperti akar, karbon organik tanah, dan karbon organik partikulat. Artikel yang sama menyatakan bahwa karbon organik tanah lazim diperlakukan sebagai indikator utama karena berkaitan erat dengan agregasi, metabolisme mikroba, dan siklus hara, khususnya di tanah tropis. Ini berarti *soil health* bukan satu angka tunggal, melainkan orkestrasi dari beberapa fungsi dan penanda. ([ScienceDirect](#))

Dari sini tampak bahwa cara pandang yang hanya mengukur sawit dari hasil panen, warna daun, atau dosis pupuk sebenarnya terlalu dangkal. Ia berguna, tetapi hanya menangkap bagian tertentu dari sistem. *Soil health* menuntut kita melihat apa yang terjadi di bawah permukaan: apakah akar memperoleh oksigen cukup, apakah tanah masih berpori dan remah, apakah mikroba bermanfaat aktif, apakah bahan organik terus didaur ulang, dan apakah interaksi akar-tanah-organisme masih bekerja mendukung produktivitas. Makalah ini memandang semua elemen itu sebagai inti keberlanjutan sawit. ([FAOHome](#))

3. Mengapa Indikator Permukaan Sering Menyesatkan

Dalam praktik perkebunan, indikator "permukaan" biasanya berbentuk dua hal: penampilan kebun dan performa produksi. Kebun dianggap baik ketika bersih, akses jalan rapi, gulma minimal, dan hasil masih tinggi. Padahal sejumlah penelitian justru menunjukkan bahwa beberapa praktik yang

membuat kebun tampak bersih dapat merugikan fungsi tanah. Studi Thoumazeau dan kolega pada smallholders Indonesia menunjukkan bahwa vegetasi bawah memiliki efek langsung dan positif terhadap indikator pemeliharaan struktur tanah, dan perbaikan struktur ini berkorelasi dengan performa sawit yang lebih baik. Dengan kata lain, kebun yang terlalu bersih belum tentu kebun yang paling sehat. ([ScienceDirect](#))

Eksperimen Ashton-Butt dan kolega memberikan pesan yang lebih tegas. Dalam manipulasi understory di perkebunan sawit, perlakuan dengan kompleksitas understory lebih tinggi—tanpa herbisida—menghasilkan keanekaragaman dan kelimpahan makrofauna tanah yang lebih tinggi, laju dekomposisi serasah yang lebih cepat, dan tidak menunjukkan penurunan kesuburan tanah dibanding perlakuan understory yang ditekan berat. Peneliti bahkan menyimpulkan bahwa pengurangan penggunaan herbisida layak didorong karena dapat meningkatkan biodiversitas tanah dan fungsi ekosistem tanpa bukti kuat adanya kompetisi hara dengan sawit. Ini berarti bahwa indikator visual “bersih” bisa berlawanan dengan indikator ekologis “sehat.” ([Frontiers](#))

Indikator produksi pun memiliki keterbatasan serupa. Literatur kompaksi sawit 2026 merangkum bahwa bukti tentang pengaruh kompaksi terhadap hasil tidak selalu seragam: ada studi yang menunjukkan penurunan hasil nyata, tetapi ada pula yang tidak menemukan perubahan langsung atau bahkan melihat efek kompensasi tertentu. Situasi seperti ini menunjukkan bahwa hasil panen dapat bertahan untuk sementara walaupun struktur tanah sedang menurun. Jika pengelola menunggu sinyal dari hasil panen saja, intervensi sering datang terlambat. ([Ejournal UNIKS](#))

Dalam konteks sertifikasi, persoalannya menjadi lebih subtil. Sertifikasi penting, tetapi standar administratif tidak otomatis menjamin kesehatan tanah yang riil di lapangan. Yang membuat sertifikasi bermakna justru ketika indikator-indikator tanah yang mendasarinya benar-benar dipantau. Menariknya, RSPO 2024 secara eksplisit mewajibkan pemantauan perubahan kesuburan tanah dan tingkat hara tanaman, serta menyatakan

bahwa kesuburan jangka panjang bergantung pada struktur, kandungan bahan organik, status hara, dan kesehatan mikrobiologis tanah. Jadi, bahkan pada level tata kelola industri, ukuran permukaan seharusnya dikoreksi oleh indikator bawah permukaan. ([RSPO](#))

Secara pedagogis, kita dapat memakai analogi kesehatan manusia. Hasil panen adalah seperti performa fisik sesaat; warna daun seperti tampilan luar; sertifikasi seperti hasil administrasi pemeriksaan. Tetapi *soil health* adalah seperti metabolisme, kualitas darah, fungsi organ, dan sistem imun. Orang bisa tampak baik-baik saja sambil membawa masalah kronis. Demikian pula kebun sawit dapat tampak produktif sambil menumpuk degradasi yang tidak terlihat. Karena itu, keberlanjutan yang serius harus bergerak dari indikator gejala menuju indikator sistem. Argumen ini merupakan sintesis dari literatur yang menekankan pentingnya struktur tanah, komunitas mikroba, dan kondisi perakaran bagi produktivitas sawit jangka panjang. ([ScienceDirect](#))

4. Dimensi Fisik: Struktur, Karbon, Agregat, dan Kompaksi

Dimensi fisik adalah fondasi pertama kesehatan tanah, karena di sinilah fungsi-fungsi lain bermula. Tanah yang sehat perlu memiliki struktur yang memadai untuk menahan air, mengalirkan udara, memberi ruang bagi akar, dan memungkinkan pergerakan organisme tanah. Dalam kerangka FAO, indikator kesehatan tanah mencakup kemudahan diolah, oksigen bagi akar, kapasitas menahan hara, dan kondisi perakaran. Pada penelitian agroforestri sawit, indikator fisik yang digunakan mencakup kepadatan dan stabilitas agregat. Ini memperlihatkan bahwa kualitas fisik tanah bukan aksesoris, melainkan inti dari cara kita membaca keberlanjutan. ([FAOHome](#))

Karbon organik tanah memainkan peran sentral dalam dimensi fisik ini. Artikel Gomes dan kolega menempatkan karbon organik tanah sebagai indikator utama *soil health* karena berkaitan dengan agregasi, metabolisme mikroba, dan siklus hara di tanah tropis. Secara praktis, karbon organik membuat tanah lebih remah, memperbaiki kemampuan menahan air, mendukung pembentukan agregat stabil, dan memberi energi bagi biota

tanah. Jika kandungan karbon organik merosot, tanah menjadi lebih padat, kurang stabil, dan lebih rentan terhadap limpasan serta erosi.

([ScienceDirect](#))

Kompaksi adalah salah satu bentuk degradasi fisik yang sangat relevan bagi sawit modern. Tinjauan Maharani dan kolega tahun 2026 menyatakan bahwa kompaksi tanah menjadi masalah serius di perkebunan sawit akibat meningkatnya mekanisasi dan intensitas praktik lapangan. Review itu juga menjelaskan bahwa kompaksi memodifikasi karakteristik fisik seperti bulk density dan porositas, serta secara tidak langsung memengaruhi daya simpan air, perkembangan akar, dan akhirnya produktivitas sawit. Ini berarti bulk density dan porositas tidak boleh dibaca sebagai angka laboratorium semata, tetapi sebagai indikator hidup-matinya ruang tumbuh akar. ([Ejournal UNIKS](#))

Yang menarik, literatur itu juga menekankan bahwa mitigasi kompaksi tidak bisa semata mekanik. Tindakan pengelolaan yang efektif harus menggabungkan aspek fisik dan biologis, termasuk pengendalian lalu lintas alat, bahan organik, mulsa EFB, dan cover crops. Implikasi konseptualnya sangat penting: kerusakan fisik tanah tidak dapat diperbaiki secara berkelanjutan tanpa pemulihan fungsi biologisnya. Inilah sebabnya pendekatan “dari akar, bukan dari permukaan” menjadi masuk akal. Kita tidak cukup merapikan permukaan atau memperdalam drainase; kita harus memperbaiki seluruh ruang tumbuh di bawah permukaan. ([Ejournal UNIKS](#))

Studi Tao dan kolega di Sumatra memperlihatkan secara konkret bagaimana bahan organik mengubah kondisi fisik tanah. Aplikasi EFB meningkatkan pH dan stabilitas agregat pada lapisan 0–10 cm, menurunkan bulk density, dan sekaligus meningkatkan aktivitas mikroba serta aktivitas fauna tanah. Ini adalah contoh ideal bagaimana satu intervensi yang tampak sederhana—mengembalikan biomassa—dapat memperbaiki sejumlah indikator fisik dan biologis sekaligus. Dalam konteks sawit, stabilitas agregat dan bulk density menjadi lebih dari sekadar angka:

keduanya adalah jendela untuk melihat apakah kebun sedang membangun atau menguras modal tanahnya. ([ScienceDirect](#))

5. Dimensi Kimia: Kesuburan, Retensi Hara, dan Daur Ulang Biomassa

Dimensi kimia tetap penting, tetapi harus dibaca sebagai bagian dari sistem, bukan satu-satunya penentu *soil health*. RSPO 2024 mewajibkan bahwa perubahan tingkat kesuburan tanah dan hara tanaman harus dipantau, didokumentasikan, dan dikelola. Pada penjelasan lampiran, RSPO menambahkan bahwa kesuburan jangka panjang bergantung pada struktur, kandungan bahan organik, status hara, dan kesehatan mikrobiologis tanah. Rumusan ini penting, karena ia menggabungkan dimensi kimia dengan dimensi fisik dan biologis. Kesuburan bukan hanya soal berapa banyak pupuk masuk, tetapi apakah tanah mampu menahan, mendaur ulang, dan menyediakan hara itu secara berkelanjutan. ([RSPO](#))

Dalam kerangka indikator, studi agroforestri sawit di Amazon menempatkan pH, Ca, Mg, P, K, Al, dan karbon oksidatif sebagai bagian dari paket evaluasi *soil health*. Ini menunjukkan bahwa kimia tanah yang relevan bukan hanya N, P, K dalam pengertian klasik, tetapi juga kondisi yang memengaruhi reaktivitas, ketersediaan, dan retensi hara. Tanah yang secara sementara mendapat pupuk tinggi bisa tampak "cukup," tetapi bila kapasitas tukar kation rendah, bahan organik minim, atau kondisi perakaran buruk, maka efisiensi hara tetap rendah. ([ScienceDirect](#))

Hidayat dan kolega memberikan bukti kuat tentang arti penting pengelolaan bahan organik jangka panjang. Dalam studi mereka, aplikasi bahan organik selama sepuluh tahun pada plot *good soil management* meningkatkan total organic carbon, total nitrogen, fosfor tersedia, kalium tersedia, dan kapasitas tukar kation. Lebih jauh lagi, plot tersebut juga memiliki lebih banyak spesies mikroba menguntungkan dan peningkatan fungsi mikrobiologis yang terkait dengan fiksasi nitrogen, pelarutan fosfat, pelarutan kalium, dan sintesis fitohormon. Temuan ini sangat penting, karena memperlihatkan bahwa kimia tanah yang baik bukan sekadar hasil

penambahan pupuk, tetapi buah dari ekologi tanah yang dipulihkan.

([Kyushu University Pure Portal Site](#))

Dari sudut pandang manajemen, hal ini membawa kita pada paradigma baru: *nutrient management* seharusnya tidak dipisahkan dari *soil health management*. Bila kebun hanya fokus pada dosis pupuk tanpa memperhatikan bahan organik, struktur, dan biologi tanah, maka sebagian besar strategi itu bersifat reaktif. Sebaliknya, bila biomassa dikembalikan, siklus residu dikelola, dan zona akar dipelihara sehat, maka tanah bekerja sebagai mitra aktif dalam pengelolaan hara. Dalam arti ini, tanah sehat bukan hanya penerima pupuk, tetapi mesin biologis yang membuat nutrisi tetap berputar dalam sistem. Argumen ini selaras dengan RSPO yang mendorong rencana daur ulang hara dan biomassa dalam pengelolaan kebun. ([RSPO](#))

6. Dimensi Biologis: Mikroba, Fauna, dan Fungsi Ekosistem Bawah Tanah

Jika dimensi fisik memberi rumah bagi kehidupan tanah, maka dimensi biologis adalah isi rumah itu. FAO menegaskan bahwa tanah sehat mempertahankan komunitas organisme tanah yang beragam, yang membantu mengendalikan penyakit, membentuk asosiasi menguntungkan dengan akar, mendaur ulang unsur hara, dan memperbaiki struktur tanah. Kalimat ini sangat penting karena memperlihatkan bahwa fungsi biologis bukan tambahan romantis pada pembahasan tanah; ia berada di inti definisi tanah sehat. ([FAOHome](#))

Studi rizosfer dan mikrobiom pada sawit menguatkan pandangan itu. Artikel mengenai mikrobiom jamur sawit menyatakan secara eksplisit bahwa mikrobiom rizosfer merupakan penentu utama kesehatan tanaman, karena dapat berinteraksi dengan inang secara langsung maupun tidak langsung untuk mendukung atau menekan produktivitas. Pernyataan ini memberikan dasar kuat bagi tesis makalah ini: bila kita hendak mengukur keberlanjutan sawit dengan serius, maka kehidupan mikroba di sekitar akar

tidak bisa diabaikan. Ia adalah bagian dari infrastruktur produktivitas.

([PMC](#))

Lebih jauh, studi Widyati dan kolega tahun 2025 menunjukkan bahwa konversi hutan tropis ke monokultur, termasuk sawit, memengaruhi ekologi tanah melalui efek langsung dan tidak langsung pada sifat fisikokimia tanah, eksudat akar, dan organisme tanah. Penelitian ini penting karena menghubungkan tiga hal yang sering dipisahkan: sifat tanah, fisiologi akar, dan komunitas organisme. Dalam bahasa yang lebih sederhana, tanah sehat tidak dapat dipahami hanya sebagai "tanah plus mikroba" atau "tanah plus akar," melainkan sebagai jaringan interaksi yang menentukan stabilitas ekologis kebun. ([ScienceDirect](#))

Eksperimen understory di perkebunan sawit juga memberi gambaran yang sangat konkret. Dua tahun setelah perlakuan, plot dengan understory yang diperkaya memiliki keragaman makrofauna tanah lebih tinggi daripada plot understory normal atau direduksi. Kelimpahan makrofauna dan laju dekomposisi serasah juga lebih tinggi, sementara tingkat hara tanah tidak menurun. Temuan ini memperlihatkan bahwa biodiversitas bawah tanah adalah indikator penting dari *soil health*, karena ia terkait langsung dengan dekomposisi, pembentukan bahan organik, dan pemeliharaan fungsi tanah. ([Frontiers](#))

Tao dan kolega menambahkan dimensi lain dengan menunjukkan bahwa aplikasi EFB meningkatkan kelimpahan tungau detritivor, aktivitas pakan fauna tanah, dan aktivitas mikroba. Hidayat dan kolega kemudian menunjukkan bahwa pengelolaan bahan organik jangka panjang meningkatkan kelimpahan mikroba menguntungkan yang berasosiasi dengan fungsi *plant growth-promoting*. Bila kita membaca temuan-temuan ini bersama-sama, maka menjadi jelas bahwa *soil health* dalam sawit tidak dapat direduksi pada "kimia tanah bagus" atau "hasil panen bagus." Tanah sehat adalah tanah yang ramai bekerja: organisme aktif, serasah terurai, unsur hara bergerak, dan akar hidup dalam lingkungan biologis yang mendukung. ([ScienceDirect](#))

7. Akar dan Rhizosphere: Frontier Baru Pengukuran Keberlanjutan

Tema “dari akar, bukan dari permukaan” mencapai makna penuhnya pada level akar dan rizosfer. Dalam banyak praktik evaluasi kebun, akar justru menjadi bagian yang paling jarang diamati karena berada di bawah tanah dan relatif mahal diukur. Akibatnya, kita lebih sering menggunakan indikator yang mudah terlihat: tinggi tanaman, warna daun, atau hasil panen. Padahal FAO menempatkan ketersediaan oksigen bagi akar dan *rooting conditions* sebagai indikator utama kesehatan tanah, sementara studi agroforestri sawit memasukkan akar dan “root stock” dalam kelompok indikator biologis. Jadi, secara ilmiah, mengabaikan akar berarti mengabaikan salah satu pusat utama keberlanjutan. ([FAOHome](#))

Akar bukan hanya organ penyerap. Akar membentuk arsitektur ruang tanah, mengeluarkan eksudat yang memengaruhi mikroba, dan menjadi penghubung antara status fisiologis tanaman dan ekologi tanah. Studi Widyati 2025 menunjukkan bahwa eksudat akar metabolit primer terkait kuat dengan sifat fisikokimia tanah, sedangkan metabolit sekunder dipengaruhi oleh sifat tanah sekaligus perbedaan ekologis antara hutan dan monokultur. Ini menunjukkan bahwa kualitas akar dan lingkungan sekitarnya bukan sekadar hasil pasif dari tanah, tetapi bagian dari proses yang membentuk kembali sifat tanah dan kerentanan tanaman terhadap penyakit. ([ScienceDirect](#))

Di sinilah terlihat kelemahan pendekatan keberlanjutan yang terlalu “permukaan.” Sebuah kebun dapat tampak efisien secara visual, tetapi bila ruang pori menyusut, bulk density naik, oksigen akar berkurang, eksudat akar bergeser, dan mikrobiom rizosfer kehilangan fungsi perlindungan, maka kebun tersebut sesungguhnya sedang bergerak ke arah sistem yang rapuh. Itulah sebabnya studi Widyati menekankan pentingnya meningkatkan diversitas di dalam monokultur, misalnya melalui agroforestri atau intercropping, demi kesehatan tanah jangka panjang. Saya memandang ini sebagai salah satu pergeseran konseptual paling penting untuk masa depan sawit: keberlanjutan harus dinilai dari kualitas

interaksi akar-tanah-organisme, bukan sekadar dari tutupan kanopi atau rapor audit. ([ResearchGate](#))

8. Praktik Pengelolaan yang Memperbaiki *Soil Health*

Setelah memahami dimensinya, pertanyaan berikutnya adalah: apa yang dapat dilakukan pengelola kebun untuk benar-benar memperbaiki kesehatan tanah? Literatur yang tersedia memberi jawaban yang cukup konsisten. Pertama, mempertahankan atau memperkaya understory secara selektif. Studi Thoumazeau di Indonesia menunjukkan bahwa biomassa understory memperbaiki indikator struktur tanah dan berhubungan dengan performa sawit yang lebih baik. Studi Ashton-Butt menunjukkan manfaat serupa terhadap biodiversitas dan dekomposisi. Dengan kata lain, vegetasi bawah bukan musuh otomatis; dalam banyak konteks, ia justru sekutu *soil health*. ([ScienceDirect](#))

Kedua, mengembalikan biomassa dan bahan organik ke kebun. EFB telah terbukti meningkatkan stabilitas agregat, menurunkan bulk density, dan mengaktifkan biota tanah. Hidayat menunjukkan bahwa aplikasi bahan organik jangka panjang memperbaiki total organic carbon, nitrogen, fosfor dan kalium tersedia, kapasitas tukar kation, serta komunitas bakteri pemacu pertumbuhan. RSPO 2024 sendiri mendorong rencana daur ulang hara dan biomassa sebagai bagian dari pemeliharaan kesuburan jangka panjang. Artinya, limbah sawit sesungguhnya dapat diubah menjadi fondasi kesehatan tanah bila dikembalikan secara benar ke sistem. ([ScienceDirect](#))

Ketiga, mengendalikan kompaksi dan lalu lintas mekanisasi. Review 2026 tentang kompaksi sawit menunjukkan bahwa pemadatan tanah dipicu oleh mekanisasi dan praktik lapangan intensif, dan bahwa perbaikannya memerlukan kombinasi kontrol lalu lintas, intervensi biologis seperti EFB dan cover crops, serta manajemen yang lebih presisi. Dari perspektif *soil health*, ini berarti bahwa produktivitas jangka panjang kebun tidak bisa dibangun di atas pemadatan berulang. Tanah yang dipaksa menanggung

tekanan mekanis tanpa pemulihan biologis akan kehilangan fungsi akar dan airnya sedikit demi sedikit. ([Ejournal UNIKS](#))

Keempat, menerapkan diversifikasi vegetasi melalui agroforestri atau intercropping di lokasi yang sesuai. Walaupun tidak semua kebun sawit cocok untuk sistem ini, literatur terbaru menunjukkan bahwa diversifikasi semacam itu dapat memperbaiki sejumlah indikator tanah. Saya memandang praktik-praktik ini bukan sebagai aksesori hijau, melainkan sebagai investasi terhadap fondasi kebun. Tanah yang lebih hidup dan lebih remah biasanya tidak segera menghasilkan lonjakan panen spektakuler, tetapi ia memperpanjang umur produktif sistem dan mengurangi ketergantungan pada koreksi input yang mahal. Pernyataan ini adalah inferensi manajerial dari literatur tentang understory, bahan organik, kompaksi, dan agroforestri sawit. ([ScienceDirect](#))

9. Agroforestri Sawit dan Pelajaran bagi Masa Depan

Salah satu perkembangan paling menarik dalam literatur sawit mutakhir adalah munculnya bukti bahwa sistem sawit yang lebih beragam secara vegetatif dapat memiliki profil kesehatan tanah yang lebih baik daripada monokultur murni. Studi Gomes dan kolega di Amazon Timur menunjukkan bahwa sistem agroforestri sawit mampu memperbaiki kualitas kimia dan biologis tanah pada lapisan permukaan dibanding hutan regenerasi, tanpa dampak negatif pada indikator karbon di lapisan lebih dalam, dan meningkatkan kesuburan mendekati kondisi alami tertentu. Temuan ini penting karena memperlihatkan bahwa sawit tidak harus selalu dibayangkan sebagai monokultur yang secara otomatis bertentangan dengan kesehatan tanah. Cara desain sistem sangat menentukan. ([ScienceDirect](#))

Temuan yang lebih spesifik datang dari Oliveira dan kolega, yang menunjukkan bahwa sistem agroforestri sawit menyimpan lebih banyak karbon dan nitrogen dalam agregat tanah dibanding monokultur di Amazon. Total stok karbon tanah pada kedalaman 0–30 cm lebih tinggi pada sistem agroforestri, dan stabilitas agregatnya juga menunjukkan

kecenderungan lebih baik. Secara konseptual, ini sangat relevan dengan tema makalah: sistem yang lebih beragam tidak hanya “lebih hijau” di atas permukaan, tetapi juga menyusun ulang kualitas tanah di bawah permukaan. ([IDEAS/RePEc](#))

Tentu saja, kita perlu berhati-hati untuk tidak mentransfer semua hasil dari Amazon ke Indonesia tanpa penyesuaian. Kondisi iklim, jenis tanah, umur kebun, manajemen residu, dan struktur sosial petani berbeda. Namun, ada pelajaran yang dapat diambil secara aman, yakni bahwa sawit berpotensi dipadukan dengan strategi yang lebih beragam secara ekologis tanpa harus kehilangan orientasi ekonominya. Pada saat sistem menjadi lebih beragam, tanah sering memperoleh lebih banyak serasah, lebih banyak akar, lebih banyak jalur karbon, dan lebih banyak niche mikroba. Dalam perspektif *soil health*, semua itu adalah modal. ([ScienceDirect](#))

Karena itu, masa depan sawit berkelanjutan mungkin bukan sekadar tentang “mengurangi kerusakan,” tetapi tentang “merancang ulang sistem” agar akar, biomassa, mikroba, dan agregat bekerja lebih produktif. Ini bukan berarti semua kebun harus diubah menjadi agroforestri penuh. Tetapi logika agroforestri—diversifikasi, penutup hayati, siklus biomassa, dan penghormatan pada fungsi bawah tanah—dapat menginspirasi desain sawit yang lebih sehat bahkan dalam sistem yang tetap dominan sawit. Argumen ini adalah sintesis normatif yang dibangun di atas bukti agroforestri sawit, studi rizosfer, dan literatur tentang understory serta bahan organik. ([IDEAS/RePEc](#))

10. Kasus Khusus Indonesia: Gambut dan Kesehatan Tanah

Pembahasan *soil health* pada sawit Indonesia tidak lengkap tanpa menyentuh gambut. Pada tanah gambut, kesehatan tanah tidak bisa dinilai dengan indikator yang sama persis seperti tanah mineral, karena persoalan utamanya sangat erat dengan muka air, subsiden, kadar organik, dan dinamika mikrobiom. RSPO untuk smallholders menegaskan bahwa sebagian besar akar serabut sawit pada gambut terkonsentrasi di lapisan atas 0–50 cm, sehingga muka air perlu dijaga dekat dengan zona itu;

panduan tersebut menyebut sistem pengelolaan air yang baik dapat mempertahankan muka air rata-rata sekitar 50 cm pada pembacaan sumur pantau dan 60 cm pada collection drains. Ini memperlihatkan secara sangat nyata bahwa kesehatan tanah pada gambut harus dibaca dari zona akar, bukan dari kekeringan permukaan semata. ([RSPO](#))

Kajian BRIN tahun 2025 tentang dinamika mikrobiom tanah pada sawit versus gambut alami juga memberikan nuansa penting. Studi itu menyatakan bahwa budidaya sawit di gambut, bila dikelola dengan benar, tidak selalu mengurangi keragaman mikroba; faktor seperti tutupan vegetasi, tipe tanah, dan muka air justru berperan penting membentuk komunitas mikroba. Temuan ini mengingatkan bahwa di gambut, *soil health* sangat bergantung pada pengelolaan hidrologi dan vegetasi. Kebun bisa tampak kering dan operasional dari permukaan, tetapi bila muka air terlalu jauh dari zona akar atau komunitas mikroba terganggu, maka keberlanjutan jangka panjang terancam. ([Ejournal Portal](#))

Dari perspektif makalah ini, pelajaran dari gambut sangat kuat: tanah sehat bukan tanah yang sekadar “mudah dikerjakan” di permukaan. Pada gambut, pengeringan berlebih justru dapat berarti tanah yang sakit, walaupun akses alat menjadi lebih mudah. Ini sekali lagi menegaskan pentingnya mengukur keberlanjutan dari akar dan fungsi bawah tanah, bukan dari kenyamanan permukaan. ([RSPO](#))

11. RSPO 2024 dan Perubahan Paradigma Pengukuran

Standar keberlanjutan yang kuat dapat menjadi alat perubahan bila ia menuntut indikator yang benar. Dalam RSPO 2024, terdapat tiga pesan penting terkait tanah. Pertama, unit sertifikasi harus memantau, mendokumentasikan, dan mengelola perubahan kesuburan tanah dan tingkat hara tanaman. Kedua, kesuburan jangka panjang dinyatakan bergantung pada struktur tanah, kandungan bahan organik, status hara, dan kesehatan mikrobiologis. Ketiga, untuk lahan miring, marginal, dan rapuh, unit sertifikasi harus mengadopsi praktik konservasi terbaik guna meminimalkan erosi dan degradasi, termasuk ground cover management,

biomass recycling, terracing, penggunaan alat berat yang tepat, konstruksi jalan yang bertanggung jawab, dan perlindungan tebing sungai. Semua ini menunjukkan bahwa standar keberlanjutan mutakhir sudah bergerak ke arah pembacaan tanah yang lebih dalam daripada sekadar fertilisasi.

([RSPO](#))

Namun, tantangan sesungguhnya terletak pada implementasi. Indikator-indikator seperti bahan organik, mikrobiologi, dan struktur tanah masih relatif lebih sulit dipantau daripada indikator input-output biasa. Karena itu, ada kecenderungan di lapangan untuk tetap berfokus pada metrik yang paling mudah dikumpulkan. Menurut saya, di sinilah lembaga sertifikasi, perusahaan, dan perguruan tinggi perlu bekerja sama membangun paket indikator *soil health* yang sederhana tetapi bermakna. Literatur seperti Biofunctool yang digunakan Thaumazeau—dengan sembilan indikator untuk kemampuan tanah mentransformasi karbon, mendaur ulang hara, dan mempertahankan struktur—menunjukkan bahwa penilaian yang lebih kaya sebenarnya mungkin dilakukan. ([ScienceDirect](#))

12. Usulan Kerangka Pengukuran Keberlanjutan Sawit Berbasis *Soil Health*

Berdasarkan sintesis literatur di atas, saya mengusulkan bahwa pengukuran keberlanjutan sawit berbasis *soil health* dapat dibangun dalam empat lapisan. Lapisan pertama adalah indikator fisik: bulk density, porositas, stabilitas agregat, infiltrasi, dan kedalaman efektif perakaran. Lapisan kedua adalah indikator kimia: pH, C-organik, N-total, P dan K tersedia, serta kapasitas tukar kation. Lapisan ketiga adalah indikator biologis: biomassa mikroba, aktivitas dekomposisi, kelimpahan atau keragaman fauna tanah, dan indikator komunitas rizosfer. Lapisan keempat adalah indikator fungsional/manajerial: biomassa understory, pengembalian residu organik, pengelolaan lalu lintas alat, kondisi drainase, dan—khusus gambut—tinggi muka air. Kerangka ini merupakan sintesis saya berdasarkan indikator FAO, protokol *soil health* pada agroforestri sawit, studi smallholder Indonesia, studi EFB, serta literatur kompaksi dan rizosfer. ([FAOHome](#))

Yang penting, kerangka ini tidak dimaksudkan mengganti seluruh indikator ekonomi dan produksi. Hasil panen, efisiensi biaya, dan mutu operasional tetap penting. Tetapi indikator-indikator itu seharusnya dibaca sebagai hasil yang disokong oleh kesehatan tanah, bukan sebagai pengganti kesehatan tanah. Bila hasil tinggi tetapi C-organik turun, bulk density naik, understory mati, dan komunitas mikroba memburuk, maka sistem itu mungkin sedang "memakan" modal ekologisnya sendiri. Dalam konteks inilah tema makalah ini harus dipahami: akar bukan ornamen wacana, melainkan pusat diagnostik keberlanjutan. ([Kyushu University Pure Portal Site](#))

Secara pedagogis, kerangka tersebut juga berguna bagi pengajaran manajemen dan keberlanjutan. Ia mengajarkan kepada mahasiswa dan praktisi bahwa *sustainability metrics* tidak boleh hanya menilai output, tetapi juga integritas proses yang melahirkannya. Dalam kebun sawit, proses itu terjadi di bawah permukaan: akar tumbuh atau terhambat, pori terbuka atau tertutup, bahan organik diputar atau dibuang, mikroba bekerja atau lumpuh, fauna tanah hidup atau hilang. Dengan kata lain, ukuran keberlanjutan yang matang harus berani masuk ke wilayah yang tidak selalu tampak. ([FAOHome](#))

13. Kesimpulan

Makalah ini menunjukkan bahwa *soil health* menawarkan cara yang lebih dalam dan lebih jujur untuk menilai masa depan sawit. Dalam definisi FAO dan indikator global tanah, kesehatan tanah bukan sekadar kesuburan kimia, melainkan kemampuan tanah berfungsi sebagai sistem hidup yang menopang produktivitas, kualitas air, kualitas udara, dan kesehatan ekosistem, dengan perhatian eksplisit pada oksigen bagi akar dan kondisi perakaran. Dalam penelitian-penelitian sawit mutakhir, indikator itu diterjemahkan ke dalam karbon organik, stabilitas agregat, bulk density, kapasitas tukar kation, biomassa akar, komunitas mikroba, fauna tanah, dan kualitas rizosfer. ([FAOHome](#))

Bukti empiris menunjukkan bahwa pemeliharaan understory, pengurangan herbisida berlebih, aplikasi biomassa organik seperti EFB, dan pengelolaan bahan organik jangka panjang dapat memperbaiki indikator-indikator tersebut. Di sisi lain, mekanisasi yang memicu kompaksi, pengeringan gambut yang terlalu jauh dari zona akar, atau monokultur yang menurunkan kualitas interaksi akar-tanah-organisme dapat melemahkan fondasi keberlanjutan sekalipun gejala permukaan belum langsung tampak. Sistem agroforestri sawit bahkan menunjukkan potensi menyimpan lebih banyak karbon dan nitrogen dalam agregat tanah dibanding monokultur, sehingga memberi arah baru bagi imajinasi keberlanjutan sawit. ([ScienceDirect](#))

Karena itu, masa depan sawit tidak boleh diukur semata-mata dari hasil panen, kebersihan kebun, atau sertifikasi di atas kertas. Ukuran-ukuran itu tetap penting, tetapi ia baru bermakna bila ditopang oleh tanah yang sehat. Mengukur keberlanjutan dari akar berarti berani menggeser fokus dari gejala ke fondasi, dari performa sesaat ke kapasitas jangka panjang, dan dari permukaan yang terlihat ke sistem bawah tanah yang bekerja diam-diam. Dalam bahasa yang paling sederhana, sawit yang berkelanjutan bukan hanya sawit yang masih panen hari ini, tetapi sawit yang tanahnya masih hidup untuk panen esok. ([RSPO](#))

Glosarium

Soil health: kapasitas tanah untuk berfungsi sebagai sistem hidup yang menopang produktivitas, kualitas air dan udara, serta kesehatan ekosistem dalam batas penggunaan lahannya. ([FAOHome](#))

Soil fertility: ketersediaan makro-hara dan unsur jejak dalam tanah untuk mendukung pertumbuhan dan produksi tanaman; merupakan bagian dari *soil health*, tetapi bukan keseluruhannya. ([RSPO](#))

Rizosfer: zona tanah yang dipengaruhi langsung oleh akar dan eksudat akar, serta menjadi ruang interaksi intens antara tanaman dan mikroorganisme. ([PMC](#))

Eksudat akar: senyawa yang dilepaskan akar ke tanah, yang dapat memengaruhi komunitas mikroba, kompetisi antartanaman, dan pertahanan terhadap patogen. ([ScienceDirect](#))

Bulk density / kepadatan isi tanah: massa tanah per satuan volume; indikator penting kompaksi, porositas, dan kemudahan akar menembus tanah. ([Ejournal UNIKS](#))

Stabilitas agregat: kemampuan agregat tanah bertahan terhadap gangguan air atau mekanik; berkaitan erat dengan erosi, infiltrasi, dan penyimpanan air. ([ScienceDirect](#))

Kapasitas tukar kation (KTK/CEC): kemampuan tanah menahan dan menukar kation hara; penting untuk efisiensi pemupukan dan retensi nutrisi. ([Kyushu University Pure Portal Site](#))

Understory vegetation: vegetasi bawah tegakan sawit yang dikelola secara selektif; dapat berkontribusi pada struktur tanah, biodiversitas, dan dekomposisi. ([ScienceDirect](#))

EFB (*empty fruit bunch*): tandan kosong kelapa sawit yang dapat dimanfaatkan sebagai mulsa atau sumber bahan organik untuk memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologis tanah. ([Lancaster University research directory](#))

Kompaksi tanah: pemadatan tanah yang meningkatkan bulk density dan menurunkan porositas, infiltrasi, serta perkembangan akar. ([Ejournal UNIKS](#))

Daftar Pustaka (APA 7)

Ashton-Butt, A. A., Aryawan, A. A. K., Hood, A. S. C., Naim, M., Purnomo, D., Suhardi, Wahyuningsih, R., Willcock, S., Poppy, G. M., Caliman, J.-P., Turner, E. C., Foster, W. A., Peh, K. S.-H., & Snaddon, J. L. (2018). Understory vegetation in oil palm plantations benefits soil biodiversity and decomposition rates. *Frontiers in Forests and Global Change*, 1, Article 10. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2018.00010>

Badan Pusat Statistik. (2024). *Statistik kelapa sawit Indonesia 2023*. BPS.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). *Global soil health*. FAO Soils Portal.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). *What is a healthy soil?* FAO.

Gomes, M. F., Oliveira, R. L. L. de, Costa, L. R. de J., Campos, W. V. da S., Kato, O. R., Castellani, D. C., & Vasconcelos, S. S. (2024). Soil health indicators in oil palm agroforestry systems in the eastern Amazon, Brazil. *Geoderma Regional*, 37, e00806. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00806>

Hidayat, F., Pane, R. D. P., Sapalina, F., Listia, E., Koga, T., Winarna, Lubis, M. E. S., Oshiro, M., Sakai, K., Utami, S. N. H., & Tashiro, Y. (2024). Long-term application of organic matter improves soil properties and plant growth-promoting bacteria in soil communities of oil palm plantation. *Soil Science and Plant Nutrition*, 70(5–6), 393–405. <https://doi.org/10.1080/00380768.2024.2380881>

Kementerian Pertanian Republik Indonesia, Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian. (2024). *Outlook kelapa sawit 2024*.

Maharani, T., Maryanti, A., Mulyani, S., Salman, S., Dewi, I. S., & Nopsagiarti, T. (2026). Soil compaction in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) plantations: A literature review. *Jurnal Agronomi Tanaman Tropika*, 8(1), 23–47. <https://doi.org/10.36378/juatika.v8i1.4981>

Oliveira, R. L. L., Gomes, M. F., Viana-Junior, A. B., Teixeira, W. G., Castellani, D. C., Kato, O. R., & Vasconcelos, S. S. (2024). Oil palm agroforestry systems store more carbon and nitrogen in soil aggregates than monoculture in the Amazon. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 29(7), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s11027-024-10166-w>

Roundtable on Sustainable Palm Oil. (2024). *2024 RSPO Principles and Criteria (Version 4.1)*. RSPO.

Tao, H.-H., Snaddon, J. L., Slade, E., Henneron, L., Caliman, J.-P., & Willis, K. J. (2018). Application of oil palm empty fruit bunch effects on soil biota and functions: A case study in Sumatra, Indonesia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 256, 105–113. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.12.012>

Thoumazeau, A., Mettauier, R., Turinah, Junedi, H., Baron, V., Chéron-Bessou, C., & Ollivier, J. (2024). Effects of fertilization practices and understory on soil health and oil palm performances in smallholdings: An Indonesian case study. *Agricultural Systems*, 213, 103802. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103802>

Widiastuti, H., et al. (2025). Soil microbiome dynamics in oil palm vs. natural peat ecosystems. *Berita Biologi*, 24(3), 523–533.

Widyati, E., Sadino, Budiharta, S., Akbar, A., Susilo, A., Kurniawan, A., Sadili, A., Prameswari, D., Mirmanto, E., Hadi, E. E. W., Siregar, M., Wardani, M., Yuniarti, N., Mindawati, N., Pasaribu, P. H. P., Irianto, R. S. B., Nisaa', R. M., Hartatik, S. E., Suharti, S., Sutiyono, Kalima, T., Sari, U. K., Darwiati, W., Herningtyas, W., Baral, H., Paradelo, M., & Santika, T. (2025). Changes in soil-root-organism interactions following tropical forest conversion to tree and oil palm plantations. *Applied Soil Ecology*, 213, 106253. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106253>

Copilot for this article: ChatGPT 5.4. Thinking (2026). Access date: 30 March 2026. Author's account ([Rudy C Tarumingkeng](#))

Rudy C Tarumingkeng: Soil Health dan Masa Depan Sawit - Mengukur Keberlanjutan dari Akar, Bukan dari Permukaan

<https://chatgpt.com/c/69c9f7ea-07f8-839d-8439-53545fd6934d>